

ÍNDICE

11.1. Metales

Aleaciones férreas

Aleaciones no férreas

Aleaciones ligeras

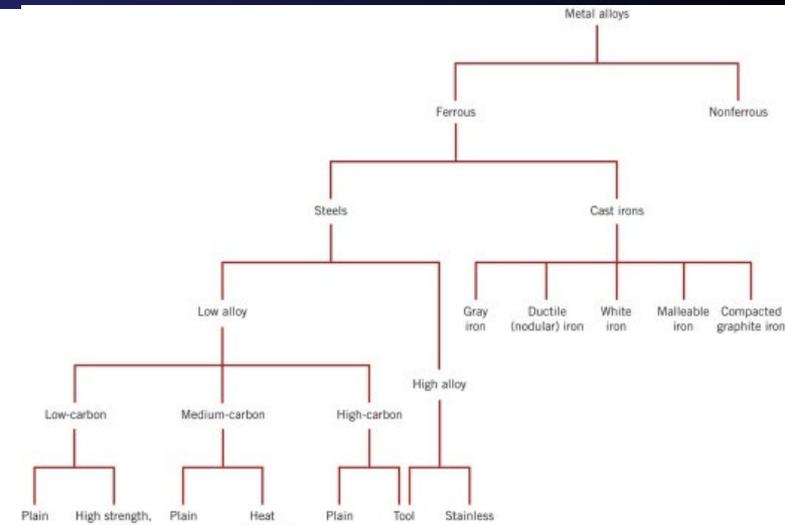
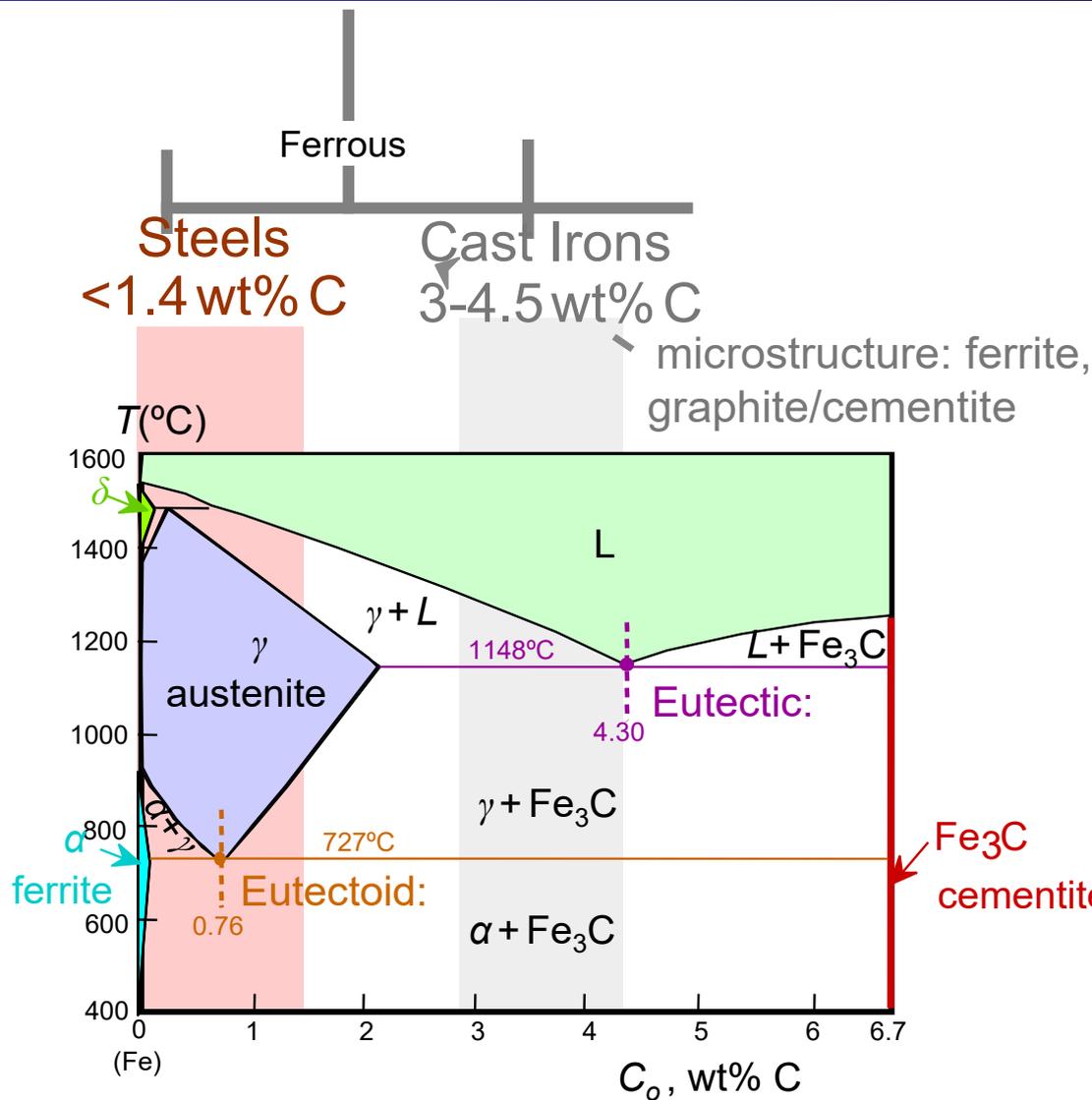
11.2. Cerámicos y vidrios



https://www.youtube.com/watch?v=h_muZ2bxWyQ

<https://www.youtube.com/watch?v=43ZEiqX17jk>

11.1- Metales. Aleaciones férreas.



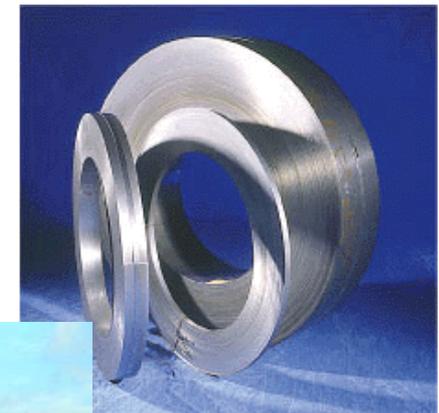
11.1- Metales. Aleaciones férreas.

Aceros

Se clasifican según el contenido en carbono: bajo, medio y alto. Subclases de acuerdo con otros elementos de aleación: **aceros al carbono** y **aceros aleados**, los elementos se añaden intencionadamente.

Densidad del hierro: $7,87 \text{ g/cm}^3$

Modulo de elasticidad: $\sim 210 \text{ GPa}$



11.1- Metales. Aleaciones férreas. Aceros al carbono y de baja aleación

Sistema de designación AISI-SAE para aceros al carbono y de baja aleación.

Numerals and digits ^a	Type of steel and nominal alloy content ^b	Numerals and digits	Type of steel and nominal alloy content	Numerals and digits	Type of steel and nominal alloy content
Carbon Steels			Nickel–Chromium–Molybdenum Steels		Chromium Steels
10XX(a)	Plain carbon (Mn 1.00% max)	43XX	Ni 1.82; Cr 0.50 and 0.80; Mo	50XXX	Cr 0.50
11XX	Resulfurized		0.25	51XXX	Cr 1.02
12XX	Resulfurized and rephosphorized	43BVXX	Ni 1.82; Cr 0.50; Mo 0.12 and 0.25; V 0.03 min	52XXX	Cr 1.45
15XX	Plain carbon (max Mn range— 1.00 to 1.65%)	47XX	Ni 1.05; Cr 0.45; Mo 0.20 and 0.35	61XX	Chromium–Vanadium Steels Cr 0.60, 0.80, and 0.95; V 0.10 and 0.15 min
	Manganese Steels	81XX	Ni 0.30; Cr 0.40; Mo 0.12		Tungsten–Chromium Steel
13XX	Mn 1.75	86XX	Ni 0.55; Cr 0.50; Mo 0.20	72XX	W 1.75; Cr 0.75
	Nickel Steels	87XX	Ni 0.55; Cr 0.50; Mo 0.25		Silicon–Manganese Steels
23XX	Ni 3.50	88XX	Ni 0.55; Cr 0.50; Mo 0.35		Si 1.40 and 2.00; Mn 0.65, 0.82, and 0.85; Cr 0.00 and 0.65
25XX	Ni 5.00	93XX	Ni 3.25; Cr 1.20; Mo 0.12	92XX	
	Nickel–Chromium Steels	94XX	Ni 0.45; Cr 0.40; Mo 0.12		High-Strength Low-Alloy Steels
31XX	Ni 1.25; Cr 0.65 and 0.80	97XX	Ni 0.55; Cr 0.20; Mo 0.20	9XX	Various SAE grades
32XX	Ni 1.75; Cr 1.07	98XX	Ni 1.00; Cr 0.80; Mo 0.25		Boron Steels
33XX	Ni 3.50; Cr 1.50 and 1.57		Nickel–Molybdenum Steels	XXBXX	B denotes boron steel
34XX	Ni 3.00; Cr 0.77	46XX	Ni 0.85 and 1.82; Mo 0.20 and 0.25		Leaded Steels
	Molybdenum Steels	48XX	Ni 3.50; Mo 0.25	XXLXX	L denotes leaded steel
40XX	Mo 0.20 and 0.25		Chromium Steels		
44XX	Mo 0.40 and 0.52	50XX	Cr 0.27, 0.40, 0.50, and 0.65		
	Chromium–Molybdenum Steels	51XX	Cr 0.80, 0.87, 0.92, 0.95, 1.00, and 1.05		
41XX	Cr 0.50, 0.80, and 0.95; Mo 0.12, 0.20, 0.25, and 0.30				

Source: *Metals Handbook*, 9th ed., Vol. 1, American Society for Metals, Metals Park, OH, 1978.

^aXX or XXX in the last two or three digits of these designations indicates that the carbon content (in hundredths of a weight percent) is to be inserted.

^bAll alloy contents are expressed in weight percent.

Aceros bajos en carbono

Es la mayor parte de todo el acero fabricado, menos del 0,2%C, no responde a tratamientos térmicos y solo endurece por acritud. Su microestructura es ferrita y perlita. Son blandos y poco resistentes, dúctiles y tenaces, fácilmente mecanizables, soldables y baratos. LE≈275MPa, R ≈415-550MPa, A% ≈ 25

Aceros **HSLA** (alta resistencia y baja aleación, aprox. 1%), contienen Cu, V, Ni y Mo. Aceptan tratamiento térmico. LE≈480MPa, dúctiles y mecanizables. Más resistentes a la corrosión, sustituyen a los aceros al carbono donde la resistencia mecánica es crítica.

Aceros medios en carbono

%C 0,25-0,6%. Son tratables térmicamente (austenización, temple y revenido) para mejorar sus propiedades mecánicas. Microestructura de martensita revenida, debido a la baja templabilidad las piezas son delgadas y se utilizan medios con alta severidad de temple. Se les adiciona Cr, Ni y Mo para mejorar la templabilidad y tener mayores combinaciones en resistencia-ductilidad. Son mas resistentes pero menos dúctiles y tenaces.

Aceros altos en carbono

Contienen entre 0,6-1,4%C, son muchos más resistentes y menos dúctiles con temple y revenido. Resistentes al desgaste y útiles para herramientas de corte. Las matrices y herramientas contienen además Cr, V, W y Mo, que pueden formar carburos muy duros y resistentes al desgaste.

11.1- Metales. Aleaciones férreas. Aceros al carbono y de baja aleación

Propiedades mecánicas y aplicaciones típicas de algunos aceros de baja aleación.

Número AISI-SAE de aleación	Composición química % en peso	Tratamiento	Resistencia a tracción		Resistencia a fluencia		Alargamiento a rotura (%)	Aplicaciones típicas
			ksi	MPa	ksi	MPa		
Aceros al manganeso								
1.340	0.40 C, 1.75 Mn	Recocido	102	704	63	435	20	Pernos de alta resistencia.
		Revenido	230	1587	206	1421		
Aceros al cromo								
5.140	0.40 C, 0.80 Cr, 0.80 Mn	Recocido	83	573	43	297	29	Engranajes de transmisión en automóviles
5.160	0.60 C, 0.80 Cr, 0.90 Mn	Revenido*	229	1580	210	1449	10	Resortes espirales y de láminas flexibles de automóviles.
		Recocido	105	725	40	276	17	
		Revenido*	290	2000	257	1773	9	
Aceros al cromo-molibdeno								
4.140	0.40 C, 1.0 Cr, 0.9 Mn, 0.20 Mo	Recocido	95	655	61	421	26	Engranajes y transmisiones de turbinas de gas para aviones.
		Revenido*	225	1550	208	1433		
Aceros al níquel-molibdeno								
4.620	0.20 C, 1.83 Ni, 0.55 Mn, 0.25 Mo	Recocido	75	517	54	373	31	Engranajes de transmisión, pernos, ejes, rodadoras, fresas de acero.
4.820	0.20 C, 3.50 Ni, 0.60 Mn, 0.25 Mo	Normalizado	83	573	53	366	29	Mecanismos para papelería, minería y movimiento de tierra.
		Recocido	99	683	67	462	22	
		Normalizado	100	690	70	483	60	
Aceros al níquel (1.83%)-cromo-molibdeno								
4.340(E)	0.40 C, 1.83 Ni, 0.90 Mn, 0.80 Cr, 0.20 Mo	Recocido	108	745	68	469	22	Secciones pesadas, trenes de aterrizaje, partes de camiones.
		Revenido*	250	1725	230	1587		
Aceros al níquel (0.55%)-cromo-molibdeno								
8.620	0.20 C, 0.55 Ni, 0.50 Cr, 0.80 Mn, 0.20 Mo	Recocido	77	531	59	407	31	Engranajes de transmisión.
8.650	0.50 C, 0.55 Ni, 0.50 Cr, 0.80 Mn, 0.20 Mo	Normalizado	92	635	52	359	26	Ejes y árboles de pequeñas máquinas.
		Recocido	103	710	56	386	22	
		Revenido*	250	1725	225	1562	10	

Fuente: Smith, W. F., *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*, 3ª ed., McGraw-Hill, Madrid, 1998.
* Revenido a 600F (315°C).

11.1- Metales. Aleaciones férreas. Aceros de alta aleación

Designación de aleaciones para algunos aceros inoxidables

Type	UNS number	Comunes Composition (wt %) ^a							
		C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
<i>Austenitic Types</i>									
201 ^b	S20100	0.15	5.5–7.5	1.00	16.0–18.0	3.5–5.5			
304	S30400	0.08	2.00	1.00	18.0–20.0	8.0–10.5			
310	S31000	0.25	2.00	1.50	24.0–26.0	19.0–22.0			
316	S31600	0.08	2.00	1.00	16.0–18.0	10.0–14.0	2.0–3.0		
347 ^c	S34700	0.08	2.00	1.00	17.0–19.0	9.0–13.0			
<i>Ferritic Types</i>									
405	S40500	0.08	1.00	1.00	11.5–14.5			0.10–0.30	
430	S43000	0.12	1.00	1.00	16.0–18.0				
<i>Martensitic Types</i>									
410	S41000	0.15	1.00	1.00	11.5–13.0				
501	S50100	0.10 min	1.00	1.00	4.0–6.0		0.40–0.65		
<i>Precipitation-Hardening Types</i>									
17–4 PH ^d	S17400	0.07	1.00	1.00	15.5–17.5	3.0–5.0		3.0–5.0	
17–7 PH	S17700	0.09	1.00	1.00	16.0–18.0	6.5–7.75			0.75–1.5

Source: Data from *Metals Handbook*, 9th ed., Vol. 3, American Society for Metals, Metals Park, OH, 1980.

^aSingle values are maximum values unless otherwise indicated.

^b0.25 wt % N.

^c10 × %C = min Nb + Ta (optional).

^d0.15 – 0.45wt % Nb+Ta.

Designación de aleaciones para algunos aceros de herramientas comunes.

Designations		Composition (wt %)									
AISI	SAE	UNS	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V	Co
<i>Molybdenum high-speed steels</i>											
M1	M1	T11301	0.78–0.88	0.15–0.40	0.20–0.50	3.50–4.00	0.30 max	8.20–9.20	1.40–2.10	1.00–1.35	
<i>Tungsten high-speed steels</i>											
T1	T1	T12001	0.65–0.80	0.10–0.40	0.20–0.40	3.75–4.00	0.30 max		17.25–18.75	0.90–1.30	
<i>Chromium hot-work steels</i>											
H10		T20810	0.35–0.45	0.25–0.70	0.80–1.20	3.00–3.75	0.30 max	2.00–3.00		0.25–0.75	
<i>Tungsten hot-work steels</i>											
H21	H21	T20821	0.26–0.36	0.15–0.40	0.15–0.50	3.00–3.75	0.30 max		8.50–10.00	0.30–0.60	
<i>Molybdenum hot-work steels</i>											
H42		T20842	0.55–0.70	0.15–0.40		3.75–4.50	0.30 max	4.50–5.50	5.50–6.75	1.75–2.20	
<i>Air-hardening medium-alloy cold-work steels</i>											
A2	A2	T30102	0.95–1.05	1.00 max	0.50 max	4.75–5.50	0.30 max	0.90–1.40		0.15–0.50	
<i>High-carbon, high-chromium cold-work steels</i>											
D2	D2	T30402	1.40–1.60	0.60 max	0.60 max	11.00–13.00	0.30 max	0.70–1.20		1.10 max	1.00 max
<i>Oil-hardening cold-work steels</i>											
O1	O1	T31501	0.85–1.00	1.00–1.40	0.50 max	0.40–0.60	0.30 max		0.40–0.60	0.30 max	
<i>Shock-resisting steels</i>											
S1	S1	T41901	0.40–0.55	0.10–0.40	0.15–1.20	1.00–1.80	0.30 max	0.50 max	1.50–3.00	0.15–0.30	
<i>Low-alloy, special-purpose tool steels</i>											
L2		T61202	0.45–1.00	0.10–0.90	0.50 max	0.70–1.20		0.25 max		0.10–0.30	
<i>Low-carbon mold steels</i>											
P2		T51602	0.10 max	0.10–0.40	0.10–0.40	0.75–1.25	0.10–0.50	0.15–0.40			
<i>Water-hardening tool steels</i>											
W1	W108	T72301	0.70–1.50	0.10–0.40	0.10–0.40	0.15 max	0.20 max	0.10 max	0.15 max	0.10 max	
	W109										
	W110										
	W112										

Source: Data from *Metals Handbook*, 9th ed., Vol. 3, American Society for Metals, Metals Park, OH, 1980.

Aceros inoxidables

Los aceros inoxidables resisten la corrosión en muchos ambientes. El cromo con un mínimo de 12% en peso es el principal elemento de aleación. El Ni y Mo mejoran esta resistencia.

Tipos: Martensítico, Ferrítico, y Austenítico, *Duplex* y *Endurecibles por precipitación*.

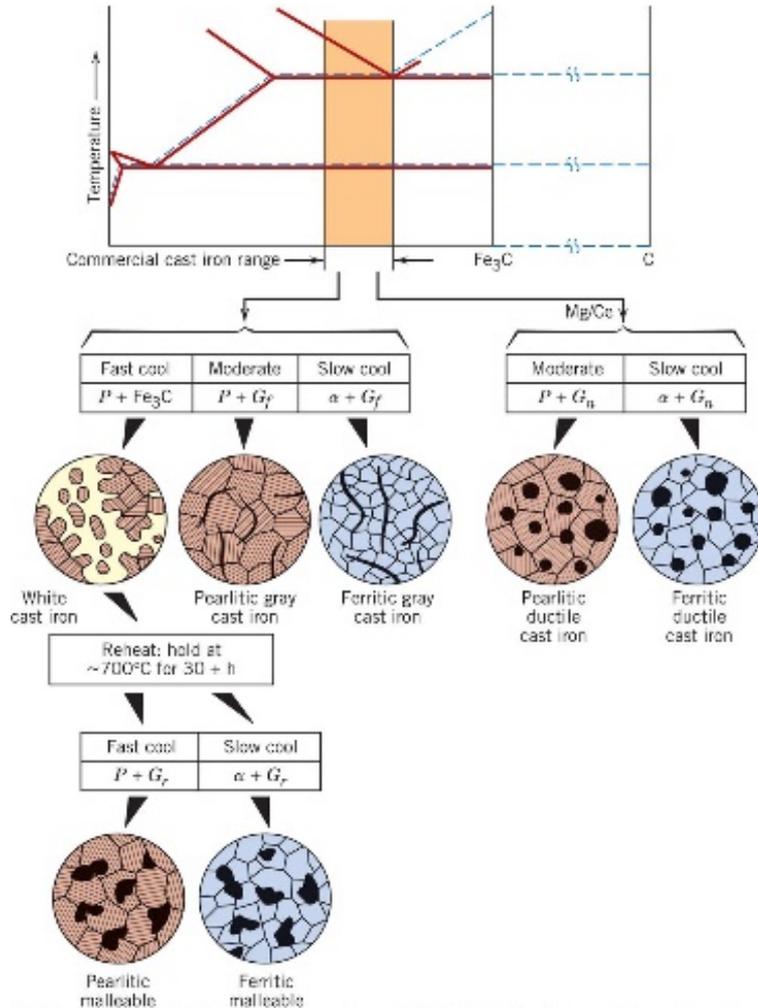
Amplia gama de propiedades mecánicas combinadas con excelente resistencia a la corrosión, muy versátil pero caro.

Los austeníticos son los más resistentes a la corrosión (alto % Cr y Ni) y muy utilizados, los martensíticos y los ferríticos son magneticos, no así los austeníticos.

Se utilizan principalmente en ambientes extremos a elevadas temperaturas (1000°C) donde la integridad mecánica y la resistencia a la corrosión los hacen insustituibles.

Los **aceros de herramientas** presentan resistencia y dureza máximas, y se emplean para cortar, mecanizar o dar forma a otro material. Resulta común la adición de gran cantidad de aleantes a este tipo de materiales, y las propiedades deseadas determinan la composición. Se requiere límite elástico elevado, por lo que la estructura óptima es la de bonificado con revenidos bajos y alto contenido en carbono. Para mejorar la tenacidad se añade silicio. Para tener resistencia en caliente se añaden W, Mo, Cr y V. Si se busca indeformabilidad durante el tratamiento térmico, se añaden grandes proporciones de Cr y Mn. Los aceros rápidos presentan gran dureza en caliente y se utilizan para mecanizar a gran velocidad.

11.1- Metales. Aleaciones férreas. Fundiciones

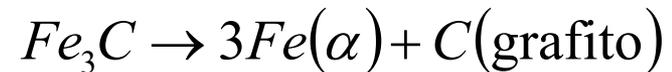


Adapted from W. G. Moffatt, G. W. Pearsall, and J. Wulff, The Structure and Properties of Materials, Vol. I, Structure, p. 195. Copyright © 1964 by John Wiley & Sons, New York.

Se trata de aleaciones férreas con un contenido en carbono mayor del 2%, aunque lo habitual es de un 3-4,5%C.

Las fundiciones funden y se moldean con facilidad, son frágiles y la mejor técnica de conformado es el moldeo.

La cementita es un compuesto inestable y bajo ciertas circunstancias se disocia de acuerdo con la reacción:



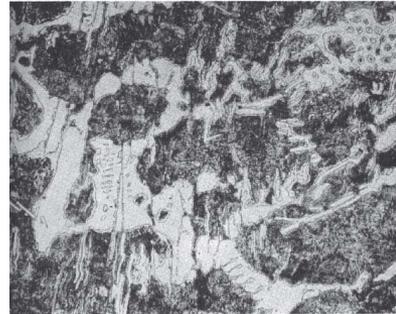
Contenido en silicio mayor al 1% y una velocidad de enfriamiento lenta durante la solidificación favorecen esta reacción, dando como resultado una dependencia de la microestructura y de las propiedades mecánicas de la composición y del tratamiento.

Designación de aleaciones para algunas fundiciones de uso común.

Alloy	UNS number	Composition (wt %)								
		C	Mn	Si	P	S	Ni+Cu	Cr	Mo	Mg
Low-carbon white iron, alloyed for abrasion resistance		2.2–2.8	0.2–0.6	1.0–1.6	0.15	0.15	1.5	1.0	0.5	
SAE J431 automotive gray iron for heavy-duty service, SAE Grade G2500a	F10009	3.40 min	0.60–0.90	1.60–2.10	0.12	0.12				
Ductile iron, unalloyed		3.50–3.80	0.30–1.00	2.00–2.80	0.08 max	0.02 max	0.02–0.60			0.03–0.05
Malleable iron, ferritic Grade 32510		2.30–2.70	0.25–0.55	1.00–1.75	0.05 max	0.03–0.18				

Source: Data from *Metals Handbook*, 9th ed., Vol. 1, American Society for Metals, Metals Park, OH, 1978.

11.1- Metales. Aleaciones férreas. Fundiciones

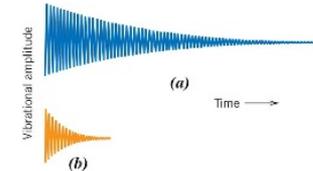


(a)



(b)

Microestructuras típicas de (a) una fundición blanca (400x), carburo eutéctico (constituyente claro) y perlita (constituyente oscuro); (b) fundición gris (100x), placas de grafito en una matriz con un 20 por ciento de ferrita libre (constituyente claro) y un 80 por ciento de perlita (constituyente oscuro).



From Metals Engineering Quarterly, February 1961. Copyright © 1961. Reproduced by permission of ASM International, Materials Park, OH.

En fundiciones bajas en carbono y con menos de 1% Si y con altas velocidades de enfriamiento, el grafito se mantiene como cementita.

La rotura tiene apariencia blanca.

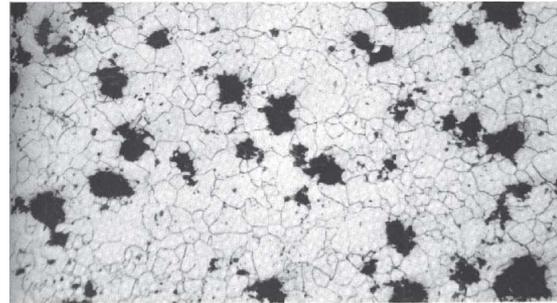
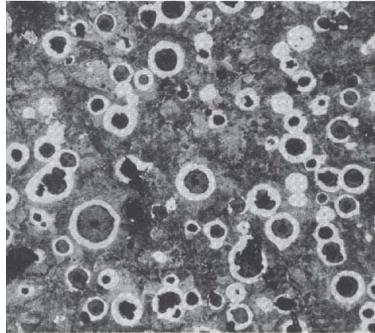
Debido a la estructura de cementita obtenida esta fundición es extremadamente dura y muy frágil, siendo inmecanizable

Entre un 2,5-4%C y 1-3%Si, el grafito aparece como escamas dentro de una matriz de ferrita o perlita. Su nombre procede del color de la fractura.

Son frágiles y poco resistentes a tracción, el grafito actúa como concentrador de tensiones, pero a compresión son excepcionales.

Amortiguan la energía vibracional, presenta alta resistencia al desgaste, presentan buena colabilidad y son baratas.

11.1- Metales. Aleaciones férreas. Fundiciones



(c) fundición dúctil (100x), nodulos de grafito (esferulitas) envueltos en ferrita, todos ellos en una matriz de perlita; y (d) fundición maleable (100x), nodulos de grafito en ina matriz de ferrita.

La presencia de Mg o Ce produce la formación de esferoides en lugar de láminas, originando propiedades mecánicas diferentes, función de la microestructura perlita o ferrita, siendo más resistentes y más dúctil que las gris. Presentando la fundición dúctil propiedades mecánicas similares a las del acero.

La fundición blanca es el producto de partida de la maleable.

La cementita se descompone y se forma grafito en forma de racimos o rosetas, dependiendo de la velocidad de enfriamiento. La microestructura es similar a la esferoidal, presentando alta resistencia y apreciable ductilidad o maleabilidad.

11.1- Metales. Aleaciones férreas. Aleaciones férreas de solidificación rápida

Algunas aleaciones férreas amorfas.

Composition (wt %)					
B	Si	Cr	Ni	Mo	P
20					
10	10				
28		6		6	
6			40		14

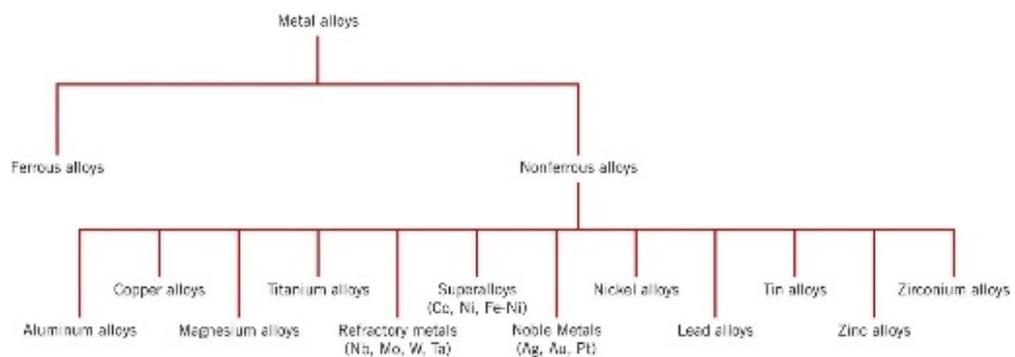
Source: Data from J. J. Gilman, "Ferrous Metallic Glasses," *Metal Progress*, July 1979.

El diseño de estas aleaciones estaba asociado originalmente a la búsqueda de composiciones eutécticas, que permitían enfriar hasta una temperatura de transición vítrea con velocidades de temple alcanzables en la práctica (de 10^5 a 10^6 °C/s).

El diseño más refinado de aleaciones ha implicado la optimización de la diferencia de tamaño entre los átomos de disolvente y soluto. El boro, en lugar del carbono, ha sido el principal elemento de aleación utilizado en las aleaciones férreas amorfas.

En las aleaciones hierro-silicio, la ausencia de bordes de grano hace que su magnetización sea sencilla y se empleen como imanes blandos para núcleos de transformador. Además de sus excelentes propiedades magnéticas, los metales amorfos tienen potencialmente una resistencia excepcional, tenacidad y resistencia a la corrosión.

11.1- Metales. Aleaciones no férreas.



© William D. Callister, Jr.

11.1- Metales. Aleaciones no férreas. Cobre y aleaciones de cobre

Primero de los metales conocidos y utilizados por la humanidad.

- Densidad: 8,96 g/cm³
- Características generales:
- Buena resistencia a la corrosión
- Elevada conductividad eléctrica y calorífica
- En general, no endurecen por tratamiento térmico (sólo los Cu-Be endurecen por precipitación)
- Endurecimiento por acritud y/o por aleación.



Clasificación del cobre y sus aleaciones.

Family	Principal alloying element	Solid solubility (at %) ^a	UNS numbers ^b
Coppers, high-copper alloys	c		C10000
Brasses	Zn	37	C20000, C30000, C40000, C66400–C69800
Phosphor bronzes	Sn	9	C50000
Aluminum bronzes	Al	19	C60600–C64200
Silicon bronzes	Si	8	C64700–C66100
Copper nickels, nickel silvers	Ni	100	C70000

Source: *Metals Handbook*, 9th ed., Vol. 2, American Society for Metals, Metals Park, OH, 1979.

^aAt 20° C (68° F).

^bWrought alloys.

^cVarious elements having less than 8 at % solid solubility at 20° C (68° F).

11.1- Metales. Aleaciones no férrreas. Níquel y aleaciones de níquel

Metales componentes fundamentales de las llamadas superaleaciones.

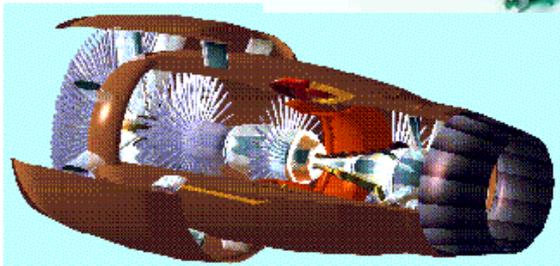
Densidad: ~8,9 g/cm³

Características generales (superaleaciones):

- Excelente resistencia a la corrosión.
- Elevada resistencia a la oxidación a altas temperaturas.
- Elevada resistencia al Creep (fluencia a alta T).
- Muy costosos.

Tipos de superaleaciones:

- Superaleaciones base níquel
- Superaleaciones base cobalto
- Superaleaciones base hierro



Alloy	UNS number	Composition (wt %)										
		Cr	Ni	Co	Mo	W	Nb	Ti	Al	Fe	C	Other
<i>Iron-base solid-solution alloys</i>												
16-25-6		16.0	25.0		6.00					50.7	0.06	1.35 Mn
<i>Cobalt-base solid-solution alloys</i>												
Haynes 25 (L-605)	R30605	20.0	10.0	50.0		15.0				3.0	0.10	1.5 Mn
<i>Nickel-base solid-solution alloys</i>												
Hastelloy B	N10001	1.0 max	63.0	2.5 max	28.0					5.0	0.05 max	
Inconel 600	N06600	15.5	76.0							8.0	0.08	
<i>Iron-base precipitation-hardening alloys</i>												
Incoloy 903		0.1 max	38.0	15.0	0.1		3.0	1.4	0.7	41.0	0.04	
<i>Cobalt-base precipitation-hardening alloys</i>												
Ar-213		19.0	0.5 max	65.0		4.5				3.5	0.5 max	0.17
<i>Nickel-base precipitation-hardening alloys</i>												
Astrolloy		15.0	56.5	15.0	5.25			3.5	4.4	<0.3	0.06	
Incoloy 901	N09901	12.5	42.5		6.0			2.7		36.2	0.10 max	
Inconel 706	N09706	16.0	41.5					1.75	0.2	37.5	0.03	2.9 (Nb + Ta)
Nimonic 80A	N07080	19.5	73.0	1.0				2.25	1.4	1.5	0.05	
Rene 41	N07041	19.0	55.0	11.0	10.0			3.1	1.5	<0.3	0.09	
Rene 95		14.0	61.0	8.0	3.5	3.5	3.5	2.9	3.5	<0.3	0.16	
Udimet 500	N07500	19.0	48.0	19.0	4.0			3.0	3.0	4.0 max	0.08	
Waspaloy	N07001	19.5	57.0	13.5	4.3			3.0	1.4	2.0 max	0.07	

11.1- Metales. Aleaciones no férreas. Níquel y aleaciones de níquel

Aleaciones de cinc, plomo y estaño

Son metales pesados y con un bajo punto de fusión. Poseen una temperatura de recristalización muy próxima a la ambiente (solo endurecen por acritud). Su dureza y resistencia mecánica son bastante bajas.

EL **cinc** es un metal con red hcp, que presenta fluencia a temperatura ambiente. Es muy sensible a la corrosión electroquímica, y es atacado por la humedad. Se emplea en procesos de galvanizado de aceros), para obtener latones y en pinturas (óxidos). Las aleaciones de cinc son fácilmente moldeables debido a su baja temperatura de fusión.

El **plomo** con red fcc, presenta excelentes propiedades químicas, es muy deformable con cargas bajas y presenta fluencia a temperatura ambiente). Es muy resistente al agua, al ácido sulfúrico. Absorbe la radiación γ y β . Tiene una colabilidad excelente y se obtiene fácilmente por moldeo. Tóxico.

EL **estaño**, metal que funde a 231 °C, es muy resistente a la corrosión ambiental y a los ácidos orgánicos, por lo que en contacto con los alimentos no resulta tóxico. Es muy deformable en frío.

Metales refractarios

En aplicaciones que requieran superar los 1000°C es preciso recurrir a materiales con alto punto de fusión que mantengan sus propiedades a elevadas temperaturas. Los metales refractarios poseen una temperatura de fusión muy elevada, superior a los 2000 °C; con interés industrial deben destacarse el W, Mo, Ta, Nb y Re. Presentan elevada densidad. Se oxidan muy fácilmente por encima de 600°C. Se trata de metales muy caros.

Otros metales

Uranio, circonio, metales preciosos

11.1- Metales. Aleaciones ligeras.

Comparación de diversas propiedades de los principales metales ligeros con las del hierro.

	Al	Mg	Ti	Be	Fe	Unidades
Red cristalina	fcc	hcp	bcc 882 °C hcp	bcc 1260 °C hcp	bcc 1392 °C fcc 911 °C bcc	
Densidad	2700	1700	4500	1850	7800	kg/m ³
T de fusión	660	650	1660	1278	1535	°C
T de ebullición	2467	1090	3287	2970	2750	°C
Calor específico	900	1025	520	1880	460	J/kg · K
Coef. dilatación	23.5	26	8.9	12	12	× 10 ⁻⁶ /K
Conductividad térmica	238	146	17	175	71	w/m · K
Conductividad eléctrica	64	38	4	42.5	17.5	%IACS
Resistencia eléctrica	0.0265	0.0445	0.42	0.04	0.097	
V óxido/V metal	1.3	0.8	1.75	1.7	2.2	
Resistencia a corrosión	Buena	Mala	Excelente	Buena	Regular	
Módulo de elasticidad	70	45	120	300	200	GPa
Resistencia a tracción	700	400	1400	850	1600	MPa
Peso estructural	5	4	7	2	10	
Rigidez de viga	8	20	3	110	1	
Potencial electroquímico	-1.7	-2.3	-1.6	-1.7	-0.4	V
Precio aproximado	6	12	600	1200	1	Euro/kg

La denominación «metales ligeros» se ha aplicado tradicionalmente al aluminio y al magnesio por emplearse frecuentemente para reducir el peso de diferentes componentes y estructuras. Del mismo modo, el titanio y el berilio han de incluirse en esta clasificación. Estos metales poseen densidades entre los 1.7 g/cm³ del magnesio y los 4.5 g/cm³ del titanio, frente a la densidad de 7.9 g/cm³ del hierro o los 8.9 g/cm³ del cobre. Esa reducción de peso se traduce en elevadas relaciones resistencia/peso y alta rigidez específica.



11.1- Metales. Aleaciones ligeras. Aluminio y aleaciones de aluminio

Metal ligero de mayor utilización.

Densidad: $2,70 \text{ g/cm}^3$ (menos que $1/3$ del acero!!!)

Características generales:

- ✓ Buena resistencia a la corrosión
- ✓ Elevada conductividad eléctrica y calorífica
- ✓ Endurecimiento por acritud y tratamiento térmico.



11.1- Metales. Aleaciones ligeras. Aluminio y aleaciones de aluminio

Se pueden clasificar según las técnicas de procesado:

•Aleaciones para forja

Familia de aluminio	Designación
Aluminio puro, 99% mínimo	1xxx
Aluminio-Cobre	2xxx
Aluminio-Manganeso	3xxx
Aluminio-Silicio	4xxx
Aluminio-Magnesio	5xxx
Aluminio-Magnesio-Silicio	6xxx
Aluminio-Zinc	7xxx
Otros elementos, Al-Sn, Al-Li, etc.	8xxx

•Aleaciones de fusión

Familia de aluminio	Designación
Aluminio sin alear	1xx.x
Aluminio-Cobre	2xx.x
Aluminio-Silicio + Mg +/-Cu	3xx.x
Aluminio-Silicio	4xx.x
Aluminio-Magnesio	5xx.x
Aluminio-Zinc	7xx.x
Aluminio-Estaño	8xx.x

...y si son o no endurecibles por precipitación (también llamadas “tratables térmicamente”):

Endurecibles por precipitación:

- Forja: 2xxx, 6xxx, 7xxx, 8xxx (Al-Li)
- Fusión: 2xx.x, (3xx.x), 7xx.x, 8xx.x

No endurecibles: el resto

11.1- Metales. Aleaciones ligeras. Aluminio y aleaciones de aluminio

Designación de estados de tratamiento de aleaciones de aluminio (EN 515).

Estado de tratamiento	Definición
F	Bruto de fabricación.
O	Recocido.
H1	Acritud solamente.
H2	Acritud y recocido parcial.
H3	Acritud y estabilizado.
W	Tratamiento térmico de solución.
T1	Enfriamiento desde la conformación en caliente y maduración natural hasta la obtención de un estado de tratamiento prácticamente estable.
T2	Enfriamiento desde el conformado en caliente, acritud y maduración natural hasta la obtención de un estado de tratamiento prácticamente estable.
T3	Tratamiento de solución, acritud y maduración natural para la obtención de un estado prácticamente estable.
T4	Tratamiento de solución y maduración natural hasta la obtención de un estado prácticamente estable.
T5	Tratamiento de temple desde conformación en caliente y maduración artificial.
T6	Solución y maduración artificial.
T7	Solución y sobremaduración/estabilizado.
T79	Sobremaduración muy limitada.
T76	Sobremaduración limitada para obtener una resistencia a la tracción máxima compatible con una buena resistencia a corrosión por exfoliación.
T74	Sobremaduración limitada, intermedia entre los estados T73 y T76, de modo que se obtenga un nivel aceptable de resistencia a la tracción, de resistencia a la corrosión bajo tensión, de resistencia a la corrosión por exfoliación y de tenacidad de fractura.
T73	Sobremaduración completa de modo que se obtenga la mayor resistencia a corrosión bajo tensión.
T8	Solución, acritud y maduración artificial.
T9	Solución, maduración artificial y acritud.
TX51	Para planchas y redondos laminados, tracción controlada con deformación permanente entre el 1 y el 3 por ciento sin enderezado posterior.
TX52	Deformación plástica del 1 al 5 por ciento obtenida por esfuerzos de compresión.
TX54	Eliminación de tensiones por combinación de tracción y compresión, en piezas matrizadas por confinamiento en frío en la matriz de acabado.

11.1- Metales. Aleaciones ligeras. Titanio y aleaciones de titanio

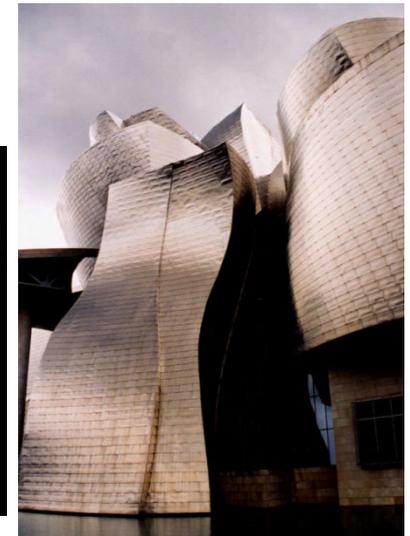
Metal ligero y de elevada resistencia

Densidad: 4,50 g/cm³

Modulo de elasticidad: ~110 GPa.

Características generales:

- ✓Excelente resistencia a la corrosión. Biocompatibilidad.
- ✓La mejor resistencia/peso de los metales.
- ✓Obtención muy difícil y por lo tanto muy caro.



11.1- Metales.

Tabla 2.1 Precio relativo aproximado por tonelada (acero dulce = 100).

Material	Precio relativo \$
Diamantes industriales	200 m
Platino	5 m
Oro	2 m
Plata	150 000
CFRP (material 70% del coste, fabricación 30%)	20 000
Cobalto/carburo de wolframio "cermets"	15 000
Wolframio	5000
Aleaciones de cobalto	7000
Aleaciones de titanio	10 000
Aleaciones de níquel	20 000
Poliimidias	8000
Carburo de silicio (cerámica fina)	7000
Aleaciones de magnesio	1000
Nailon 66	1500
Policarbonato	1000
PMMA	700
Magnesia, MgO (cerámica fina)	3000
Alúmina, Al ₂ O ₃ (cerámica fina)	3000
Acero de herramientas	500
GFRP (material 60% del coste, fabricación 40%)	1000
Aceros inoxidables	600
Cobre deformado (láminas, tubos, barras)	400
Cobre, lingotes	400
Aleaciones de aluminio, deformado (láminas, barras)	400
Aluminio, lingotes	300
Latón, deformado (láminas, tubos, barras)	400
Latón, lingotes	400
Epoxi	1000
Poliéster	500
Vidrios	400
Espumas poliméricas	1000
Zinc, deformado (láminas, tubos, barras)	400
Zinc, lingotes	350
Plomo, deformado (barras, láminas, tubos)	250
Plomo, lingotes	200
Caucho natural	300
Polipropileno	200
Poliétileno de alta densidad	200
Poliestireno	250
Maderas duras	250
Poliétileno de baja densidad	200
Policloruro de vinilo	300
Contrachapado	200
Aceros de baja aleación	130
Acero dulce, deformado (ángulos, láminas, barras)	100
Fundición	90
Hierro, lingotes	70
Maderas blandas	70
Hormigón, reforzado (vigas, columnas, planchas)	50
Gasóleo	50
Cemento	20
Carbón	20

Tabla 2.2 Importe de los materiales de ingeniería, materia prima y "semis": porcentaje del coste total.

Hierro y aceros	27
Madera y sus productos	21
Cobre	13
Plásticos	9,7
Plata y platino	6,5
Aluminio	5,4
Caucho	5,1
Níquel	2,7
Zinc	2,4
Plomo	2,2
Estaño	1,6
Pasta/papel	1,1
Vidrio	0,8
Wolframio	0,3
Mercurio	0,2
Otros	1,0

Ashby vol 1. 978-84-291-7255-3 © Ed. Reverté, 2008

11.1- Metales. Aleaciones ligeras. Titanio y aleaciones de titanio

Problema: Un motivo común para la selección de aleaciones no férricas es su baja densidad comparada con las de los aceros estructurales. La densidad de un aleación puede aproximarse por la media ponderada de las densidades de los elementos constituyentes. Calcúlense de esta manera las densidades de las aleaciones de aluminio

$$\begin{aligned}\rho_{3003} &= 0.9775 \rho_{Al} + 0.0125 \rho_{Mn} + 0.01 \rho_{Mg} \\ &= [0.9775(2.70) + 0.0125(7.47) + 0.01(1.74)] \text{ Mg/m}^3 \\ &= \underline{\underline{2.75 \text{ Mg/m}^3}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\rho_{2048} &= 0.948 \rho_{Al} + 0.004 \rho_{Mn} + 0.033 \rho_{Cu} + 0.015 \rho_{Mg} \\ &= [0.948(2.70) + 0.004(7.47) + 0.033(8.93) \\ &\quad + 0.015(1.74)] \text{ Mg/m}^3 = \underline{\underline{2.91 \text{ Mg/m}^3}}\end{aligned}$$

PROBLEMA : Se necesita una aleación cobre-níquel para una aplicación estructural en particular. La aleación debe tener una dureza superior a 80 *RF* y ductilidad menor del 45 por ciento ¿Cuál es el intervalo de composición de la aleación permisible?, (b) Para el intervalo de composiciones de la aleación cobre-níquel determinado en el apartado (a), ¿qué aleación concreta sería preferible basándose en el coste, si el precio del cobre es aproximadamente de 3.70 dólares/kg y el del níquel de 10.30 dólares/kg?

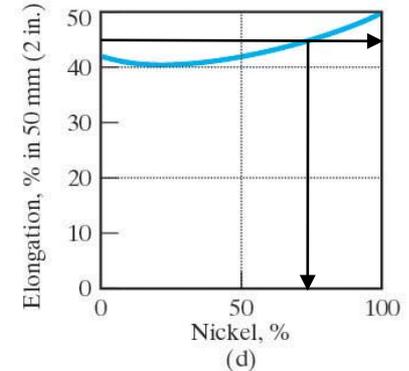
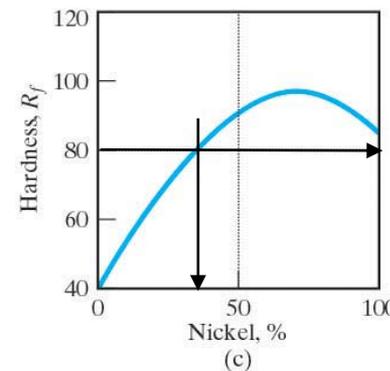
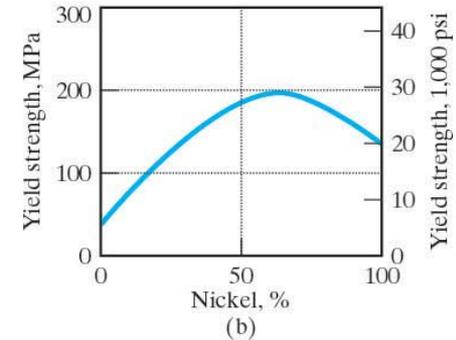
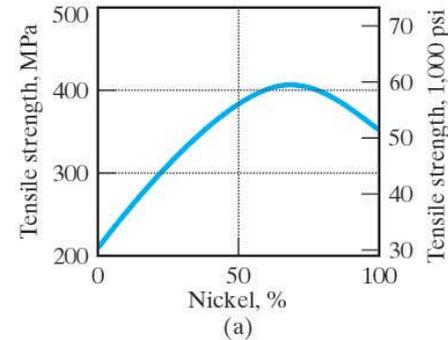
(a) Again using Figure 11-12, we obtain property ranges:

Hardness > 80 *R_f* : 34 < %Ni < 100

Elongation < 45% : 0 < %Ni < 79

Giving a net "window" of 34 < %Ni < 79

(b) As Cu is the less costly component, its amount should be maximized and, conversely, the %Ni minimized. Therefore, the 34%Ni alloy is preferred.



Variación de las propiedades mecánicas de las aleaciones cobre-níquel con la composición. Recuérdese que el cobre y el níquel forman un diagrama de fases con solubilidad total en estado sólido

11.1- Metales. Aleaciones ligeras. Titanio y aleaciones de titanio

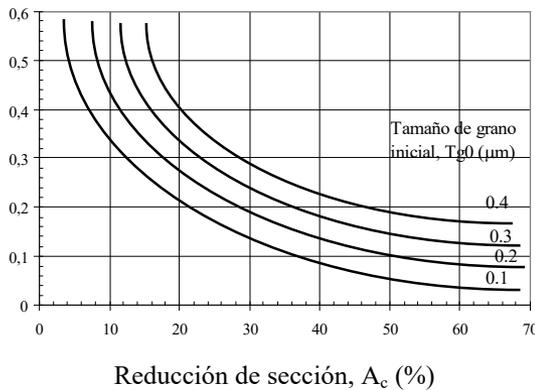
Problema . Una probeta no deformada de una aleación de cobre, tiene un diámetro medio del grano de 0.4 μm . Se le pide que reduzca el tamaño del grano a 0.2 μm . Considerando las gráficas siguientes, analizar si es esto posible, y si lo es:

Explicar los procedimientos que se utilizarían y el nombre de los procesos involucrados.

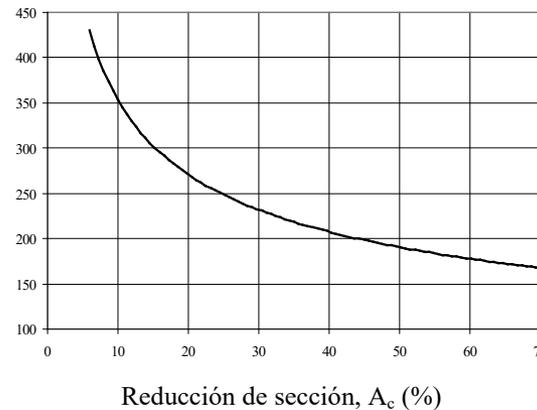
Temperatura de recocido de recristalización.

Carga de rotura alcanzada por la aleación tras la deformación en frío.

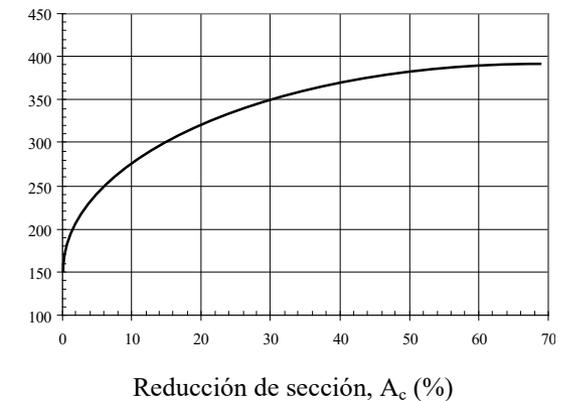
Tamaño de grano recristalizado, T_g (μm)



Temperatura de recristalización ($^{\circ}\text{C}$)



Resistencia a la tracción (Mpa)

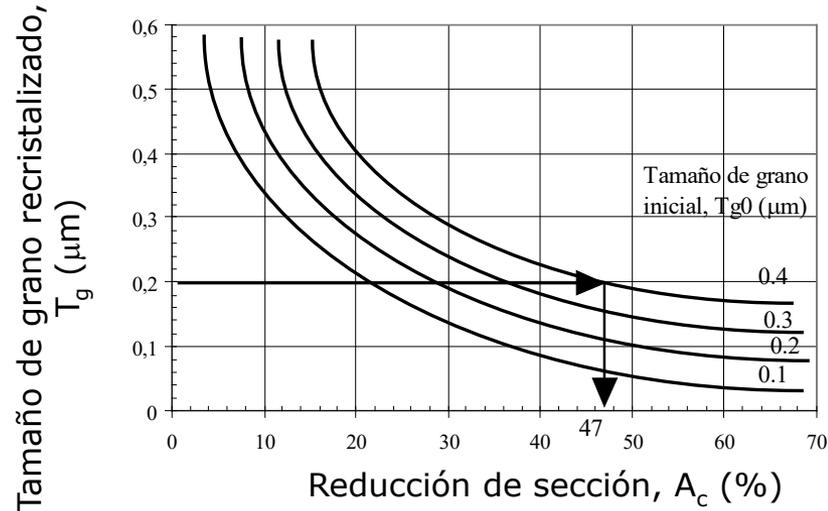


11.1- Metales. Aleaciones ligeras. Titanio y aleaciones de titanio

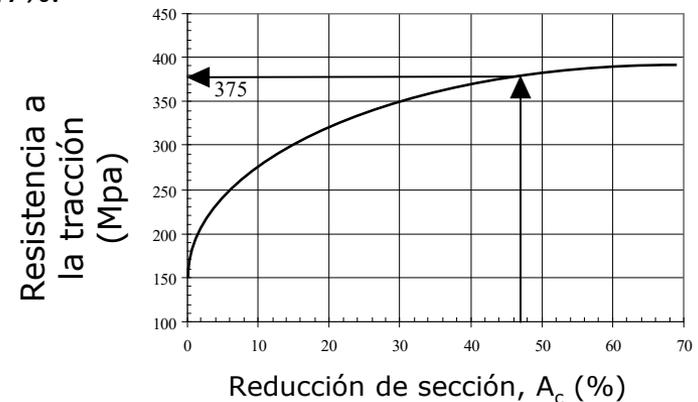
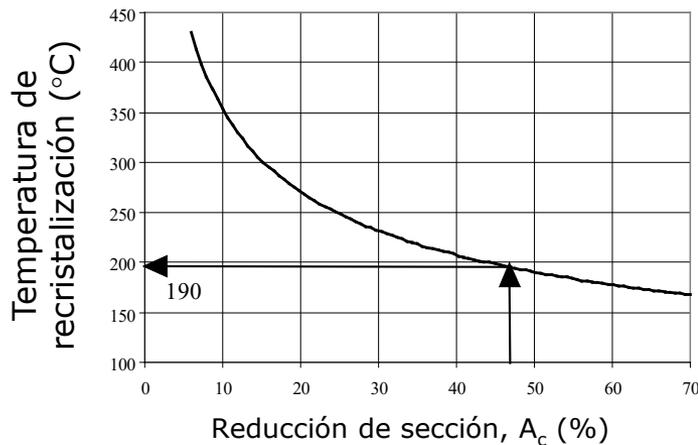
Solución:

De la gráfica obtenemos que si es posible obtener un tamaño de grano de un diámetro de $0.2 \mu\text{m}$, con una deformación mínima de un 47 %.

- a) Para obtener el tamaño de grano debería realizarse proceso de deformación plástica en el que se asegurara una reducción de la sección de un 47% al menos, seguido de un recocido de recristalización de al menos 190°C , por el tiempo necesario.
- b) De la gráfica correspondiente obtenemos la temperatura mínima de recristalización de 190°C .



- c) De igual forma, obtenemos en la gráfica correspondiente una resistencia a la tracción de 375 MPa tras la reducción de sección del 47%.



Problema 4. *El tratamiento de sinterización de microesferas de Ti en una prótesis de cadera realizada en una aleación Ti-6Al-4V, se realiza a 1250 °C durante 2 horas. Si se parte de un tamaño de grano de 0,014 mm de diámetro equivalente, éste pasa tras el tratamiento a un diámetro de 0,32 mm.*

Considerando la ecuación $D^2 - d^2 = k \cdot t \cdot e^{-Q/RT}$, donde $Q = 107$ kJ/mol y $R = 8,314$ J/mol·K.

- a) *¿Cuál sería el tamaño de grano resultante si se realizara el tratamiento durante sólo una hora?*

- b) *¿A que temperatura se consigue un tamaño de grano de 0,32 mm con tan solo una hora de tratamiento?*

Solución:

a) Considerando las condiciones de tratamiento reseñadas, puede calcularse la constante k de la ecuación:

$$k = \frac{D^2 - d^2}{t \cdot e^{-Q/RT}} = \frac{0,32^2 - 0,014^2}{2 \cdot e^{-107 \cdot 10^3 / 8,314 \cdot (1250 + 273)}} = \frac{0,1022}{2 \cdot 2,1383 \cdot 10^{-4}} = \frac{0,1022}{4,2766 \cdot 10^{-4}} = 238,976 \text{ mm}^2 / \text{h}$$

con lo que para una hora de tratamiento, el tamaño de grano sería:

$$\begin{aligned} D^2 &= d^2 + k \cdot t \cdot e^{-Q/RT} = 0,014^2 + 238,976 \cdot 1 \cdot e^{-107 \cdot 10^3 / 8,314 \cdot (1250 + 273)} = \\ &= 1,96 \cdot 10^{-4} + 238,976 \cdot 2,1383 \cdot 10^{-4} = 0,0513 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

y por tanto,

$$D = \sqrt{0,0513} = 0,226 \text{ mm}$$

b) Para el tiempo de una hora, la temperatura a la que se obtendrá un tamaño de grano de 0,32 mm será:

$$D^2 - d^2 = k \cdot t \cdot e^{-Q/RT} \quad \rightarrow \quad e^{-Q/RT} = \frac{D^2 - d^2}{k \cdot t} = \frac{0,32^2 - 0,014^2}{238,976 \cdot 1} = 4,2766 \cdot 10^{-4}$$

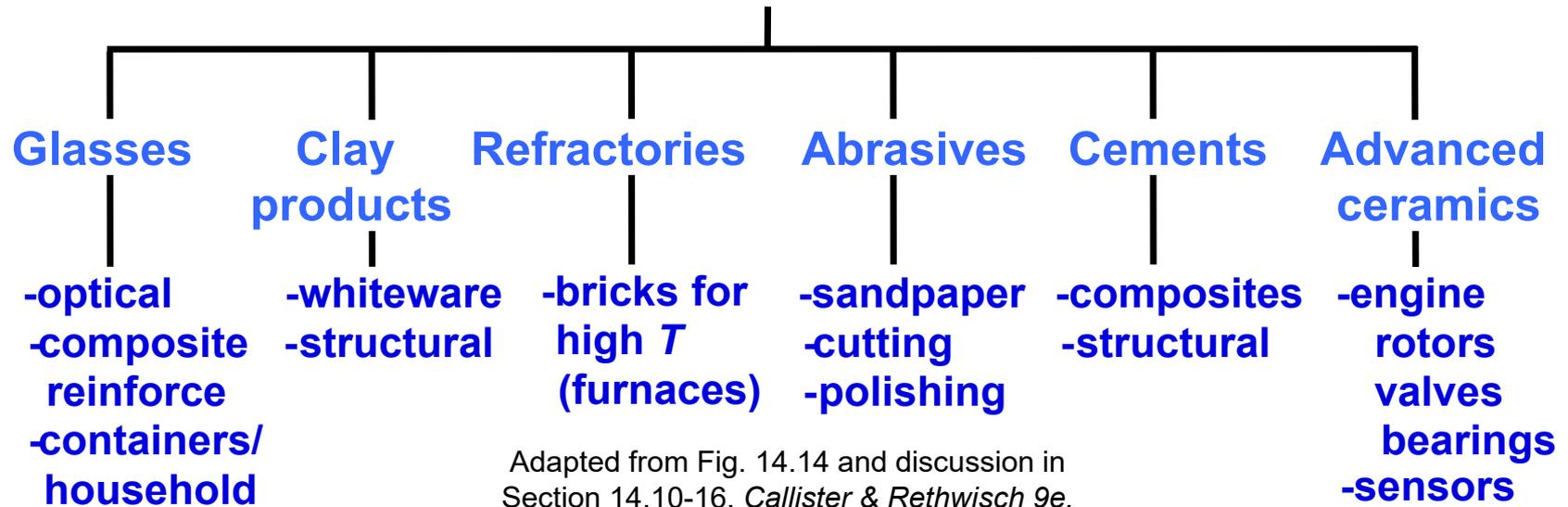
entonces:

$$\frac{Q}{R \cdot T} = -\ln(4,2766 \cdot 10^{-4}) = 7,757$$

$$T = \frac{Q}{R \cdot 7,757} = \frac{107 \cdot 10^3 \text{ J/mol}}{7,757 \cdot 8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}} = 1659 \text{ K} = 1386 \text{ }^\circ\text{C}$$

Classification of Ceramics

Ceramic Materials



Adapted from Fig. 14.14 and discussion in Section 14.10-16, *Callister & Rethwisch 9e.*

11.2- Cerámicas y vidrios

Los cerámicos y los vidrios son algunos de los materiales de ingeniería más antiguos y más resistentes a las condiciones ambientales.

También son algunos de los materiales más avanzados que se están desarrollando para la industria aeroespacial y electrónica.

Cerámicos cristalinos incluyen los silicatos tradicionales y los muchos compuestos oxídicos y no oxídicos empleados tanto en las tecnologías tradicionales como en las avanzadas.

Los **vidrios** son sólidos no cristalinos con composiciones comparables a las de los cerámicos cristalinos. La ausencia de cristalinidad, obtenida a partir de técnicas específicas de procesamiento, proporciona un conjunto único de propiedades mecánicas y ópticas. Químicamente, los vidrios se subdividen por conveniencia en silícicos y no silícicos.

Las **vitrocerámicas**, son otro tipo de materiales cristalinos que se conforman inicialmente como vidrios, y posteriormente cristalizan de una manera cuidadosamente controlada



11.2- Cerámicas y vidrios. Cerámicos. Materiales cristalinos

Basados en el SiO_2 . Debido a que el silicio y el oxígeno conjuntamente suponen aproximadamente el 75 por ciento de los elementos presentes en la corteza terrestre, estos materiales son muy abundantes y económicos.



Muchos de los cerámicos tradicionales que se utilizan pertenecen a esta categoría.

Composición de algunos silicatos cerámicos

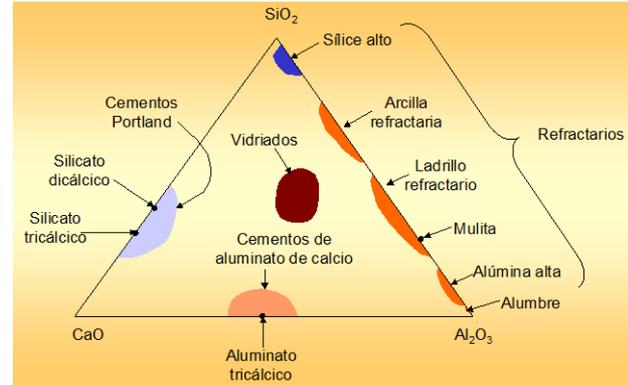
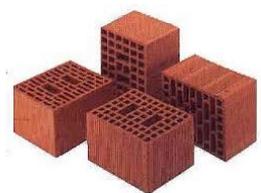
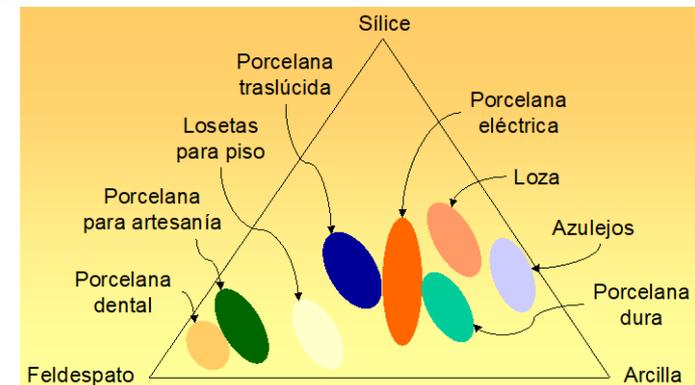
Cerámico	Composición (% en peso)					
	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	MgO	CaO	Otros
Sílice refractaria	96					4
Ladrillo refractario	50-70	45-35				5
Mullita refractaria	28	72				—
Porcelana eléctrica	61	32	6			1
Porcelana	64	5		30		1
Cemento portland	25	9			64	2

Cerámicas blancas, que son cerámicos cocidos comerciales, con una microestructura típicamente blanca y con un tamaño de grano fino.

La **arcilla** es la base de los *productos estructurales arcillosos*, como el ladrillo, la teja, el azulejo y el tubo de gres. En la Tabla 12.1 se resumen las composiciones generales de algunos ejemplos comunes.

Los **refractarios** son materiales estructurales resistentes a las altas temperaturas, que juegan papeles primordiales en la industria. Cerca del 40 por ciento de la producción de la industria de los refractarios consiste en silicatos base arcilla.

* Se trata de composiciones aproximadas, en las que se indican los componentes principales. Los niveles de impureza pueden variar de forma significativa de producto a producto.



11.2- Cerámicas y vidrios. Cerámicos. Materiales cristalinos

Algunos cerámicos de óxidos no silicatos.

Composición ^a	Nombre común
Al ₂ O ₃	Alúmine, alúmine refractaria
MgO	Magnesia, magnesia refractaria, magnesita refractaria, periclase refractaria
MgAl ₂ O ₄ (= MgO · Al ₂ O ₃)	Espinela
BeO	Óxido de berilio
ThO ₂	Óxido de torio
UO ₂	Óxido de uranio
ZrO ₂ (stabilized ^b with CaO)	Zircona estabilizada (total o parcialmente)
BaTiO ₃	Titanato de bario
NiFe ₂ O ₄	Ferrita de níquel

Tabla 19.1 Aplicaciones de los cerámicos de altas prestaciones.

Aplicación	Propiedad	Material
Herramientas de corte	Dureza y tenacidad	Alúmina, sialones
Rodamientos, revestimientos, sellantes	Resistencia al desgaste	Alúmina, circona
Maquinaria agrícola	Resistencia al desgaste	Alúmina, circona
Componentes de motores y turbinas, boquillas de quemadores	Resistencia al calor y al desgaste	SiC, Si ₃ N ₄ , alúmina, sialones, composites cerámico-cerámico
Protección, blindaje	Dureza y tenacidad	Alúmina, carburo de boro
Ventanas de altas prestaciones	Transparencia y resistencia mecánica	Alúmina, magnesia
Huesos artificiales, dientes, juntas	Resistencia al desgaste, dureza	Circona, alúmina
Soportes de circuitos integrados	Aislamiento, resistencia térmica	Alúmina, magnesia

Ashby vol 2. 978-84-291-7256-0 © Ed. Reverté, 2009

Los óxidos puros son compuestos con niveles de impureza inferiores a veces al 1 por ciento en peso, y en algunos casos, niveles de impureza del orden de partes por millón (ppm). El coste de la separación química y el procesado supone un fuerte contraste con la economía de los cerámicos de silicato fabricados a partir de los minerales generalmente impuros.

Estos materiales avanzados encuentran múltiples usos en áreas como la industria electrónica.



Vidrio de uranio brillando bajo luz UV



Algunos cerámicos no oxídicos.

Composición	Nombre común
SiC	Carburo de silicio
SiN	Nitruro de silicio
TiC	Carburo de titanio
TaC	Carburo de tantalio
WC	Carburo de wolframio
B ₄ C	Carburo de boro
BN	Nitruro de boro
C	Grafito

- ELEVADAS RESISTENCIAS MECÁNICAS A ALTA TEMPERATURA
- ELEVADA RESISTENCIA AL DESGASTE
- MAYOR TENACIDAD



CERÁMICAS OXÍDICAS (BLANCAS)

CERÁMICAS NO OXÍDICAS (NEGRAS)



11.2- Cerámicas y vidrios. Cerámicos. Materiales cristalinos

PROBLEMA : ¿Cuál es la fracción en peso del Al_2O_3 en la espinela ($MgAl_2O_4$)?

$$\text{mol. wt. } MgO = [24.31 + 16.00] \text{ amu} = 40.31 \text{ amu}$$

$$\text{mol. wt. } Al_2O_3 = [2(26.98) + 3(16.00)] \text{ amu} = 101.96 \text{ amu}$$

$$\text{wt. fraction } Al_2O_3 = \frac{101.96}{101.96 + 40.31} = \underline{\underline{0.717}}$$

Problema: Queremos obtener un vidrio a partir de mezclar: 700 kg de SiO_2 , 200 kg de CO_3Ca y 100 kg de CO_3Na_2 . Determinar la carga del horno. Los kg finales

Datos: Pesos atómicos

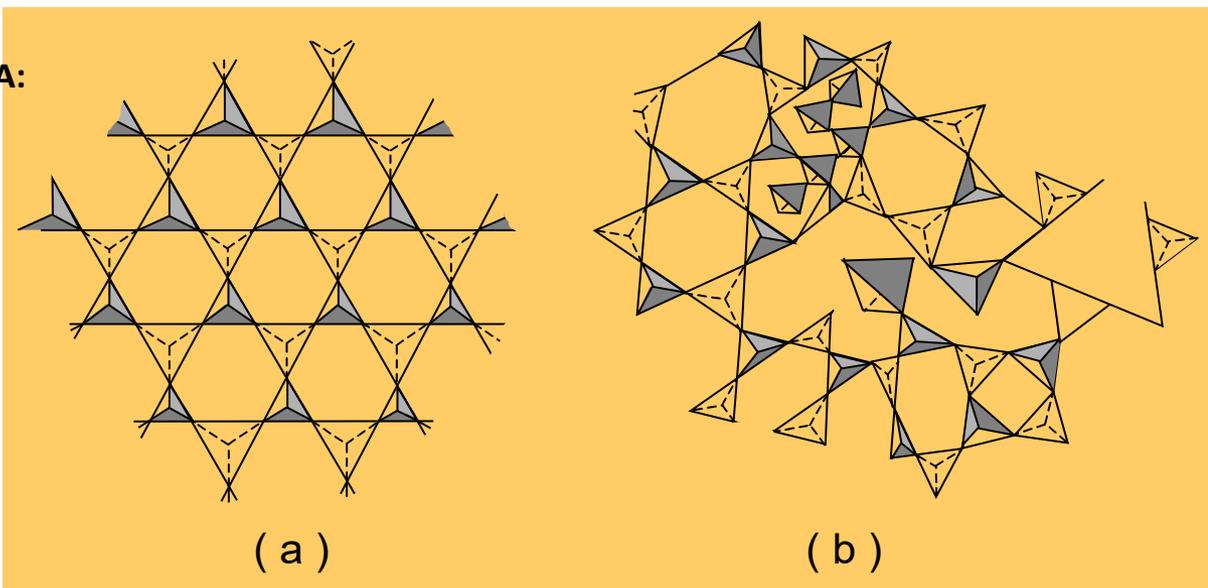
C=12g/mol; O=16g/mol; Si=28g/mol; Ca=40g/mol; Na=23g/mol

11.2- Cerámicas y vidrios. Vidrios. Materiales no cristalinos

- ✓FRAGIL
- ✓DUREZA
- ✓RESISTENCIA A CORROSION
- ✓AISLANTES
- BAJA RUGOSIDAD
- TRANSPARENCIA

Glass	Composition (wt %)									
	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	CaO	MgO	K ₂ O	ZnO	PbO	Others
Vitreous silica	100									—
Borosilicate	76	13	4	5	1					1
Window	72		1	14	8	4				1
Container	73		2	14	10					1
Fiber (E-glass)	54	8	15		22					1
Bristol glaze	60		16		7		11	6		—
Copper enamel	34	3	4				17		42	—

ESTRUCTURA:



Fase cristalina ideal de la cristobalita

Vidrio de sílice corriente.

11.2- Cerámicas y vidrios. Vidrios. Materiales no cristalinos

La **silice vitrea** es SiO_2 de alta pureza. *Vitreo* es sinónimo de amorfo o no cristalino. Puede soportar temperaturas de servicio superiores a $1000\text{ }^\circ\text{C}$. Se utiliza típicamente en crisoles de alta temperatura y ventanas de homo.

Los **vidrios de borosilicato** poseen en la red una combinación de poliedros triangulares de $\text{B}_2\text{O}_3^{3-}$ y de tetraedros de SiO_4^{4-} . Añadir al vidrio en tomo al 5 por ciento en peso de Na_2O le proporciona buena conformabilidad sin sacrificar la durabilidad asociada a los óxidos formadores de vidrios.

El grueso de la industria del vidrio está centrado en los **vidrios sódico-cálcicos**, con una composición de aproximadamente el 15 por ciento en peso de Na_2O , 10 por ciento en peso de CaO y 70 por ciento en peso de SiO_2 . La mayoría de los **vidrios de ventana** y los **recipientes de vidrio** pueden encontrarse dentro de un pequeño intervalo de composiciones.

Vidrio E, para fabricar fibras de los materiales compuestos.

Esmaltes cerámicos, recubrimientos de vidrio a cerámicas tradicionales.

Esmaltes metálicos, recubrimientos vítreos sobre metales

Glass	Composition (wt %)									
	SiO_2	B_2O_3	Al_2O_3	Na_2O	CaO	MgO	K_2O	ZnO	PbO	Others
Vitreous silica	100									—
Borosilicate	76	13	4	5	1					1
Window	72		1	14	8	4				1
Container	73		2	14	10					1
Fiber (E-glass)	54	8	15		22					1
Bristol glaze	60		16		7		11	6		—
Copper enamel	34	3	4				17		42	—

Coloración del vidrio

11.2- Cerámicas y vidrios. Vitrocerámicas

Materiales cerámicos que combinan la naturaleza de las cerámica cristalinas y los vidrios; produciendo unos materiales con características especialmente atractivas.

Son materiales cristalinos que se conforman inicialmente como vidrios y posteriormente **crystalizan de manera cuidadosamente controlada**.

El proceso por el que los vidrios pueden transformarse desde un estado no cristalino a un estado cristalino se realiza a temperatura elevada y se denomina desvitrificación.

Este proceso ha sido siempre indeseable en la transformación del vidrio ya que el material se vuelve no transparente y más frágil (tensiones residuales).

La transformación de desvitrificación se controla tan adecuadamente que se produce un material de grano muy pequeño, libre de tensiones, con características especiales: **vitrocerámica**.

Propiedades:

- ✓ Coeficiente de dilatación térmica pequeño (no presenta choque térmico).
- ✓ Resistencia mecánica alta.
- ✓ Conductividad térmica alta.
- ✓ Facilidad de fabricación.

Glass-ceramic	Composition (wt %)							
	SiO ₂	Li ₂ O	Al ₂ O ₃	MgO	ZnO	B ₂ O ₃	TiO ₂ ^a	P ₂ O ₅ ^a
Li ₂ O–Al ₂ O ₃ –SiO ₂ system	74	4	16				6	
MgO–Al ₂ O ₃ –SiO ₂ system	65		19	9			7	
Li ₂ O–MgO–SiO ₂ system	73	11		7		6		3
Li ₂ O–ZnO–SiO ₂ system	58	23			16			3

Source: Data from P. W. McMillan, *Glass-Ceramics*, 2nd ed., Academic Press, Inc., NY, 1979.

^aNucleating agents.

Aplicaciones: artículos de cocina para hornos, aisladores, sustratos de placas de circuitos integrados.

Composición típica: 70% SiO₂ 18% Al₂O₃ 4,5% TiO₂ 2,5% Li₂O

Para inducir el proceso de desvitrificación se ha de añadir un agente nucleante, normalmente dióxido de titanio (TiO₂).